



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Diseño de un sistema de tratamiento físico-químico para la remoción de metales pesados de los residuos líquidos peligrosos generados en los laboratorios ambientales de la ciudad de Quito, provincia de Pichincha, tomando como caso de estudio a ALS ECUADOR

Túqueres León, Jessica Liseth

Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología

Centro de Posgrados

Maestría en Sistemas de Gestión Ambiental

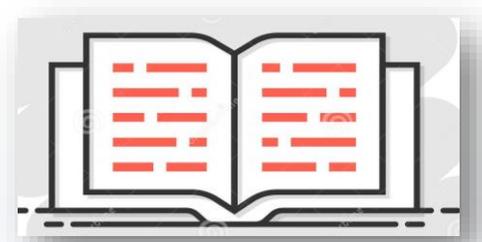
Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Magíster en Sistemas de Gestión Ambiental

Directora: Ing. Margarita Haro, Mgtr.

Oponente: Ing. Esthela Salazar, PhD.

27 de octubre del 2022

Resumen



INTRODUCCIÓN

En el Ecuador, a partir de la publicación del Acuerdo Ministerial 061 del 04 de mayo del 2015, las leyes ambientales han adquirido mayor peso en el sector industrial, por lo que las empresas se ven obligadas a que sus actividades productivas no generen impactos ambientales negativos y cumplan con las normas legales; en ese sentido, los laboratorios ambientales juegan un papel importante.

PROBLEMA

Un laboratorio ambiental al encargarse de realizar tomas de muestras de aguas, suelos, sedimentos, entre otros, utiliza productos químicos para sus ensayos químicos cuyos residuos deben tener un correcto almacenamiento y manejo, sin embargo, justamente ésta es una de las grandes falencias de este tipo de actividades debido al poco espacio con el que cuentan o por la incorrecta gestión de los mismos.

OBJETIVO

Por tal motivo, la presente investigación tiene como objetivo proponer un sistema de tratamiento físico químico mediante una técnica de neutralización y precipitación para reducir la concentración de metales pesados presentes en los residuos ácidos para descargar el agua tratada al alcantarillado y solamente el lodo formado entregar al gestor ambiental, tomando como caso de estudio a ALS ECUADOR.

METODOLOGÍA

Para lo cual se realizó una serie de prácticas a escala de laboratorio, una caracterización química de las muestras tratadas y con los resultados obtenidos se diseñó y construyó un reactor químico tipo batch de acero galvanizado, impulsor tipo turbina y agitación automática para tratar 20 litros de desecho para finalmente elaborar un análisis de costos y calcular el ahorro económico en gestión de residuos.

IMPORTANCIA

La implementación de este sistema de tratamiento logró remover la concentración de metales pesados en un 90% (a excepción del Al) lo cual permite que cumpla con los límites máximos permisibles establecidos en la Tabla 1 (descarga) de la OM 138 del DMQ y un ahorro de \$0,43/litro.

Palabras claves: residuos líquidos ácidos, metales pesados, neutralización, precipitación, reactor químico batch.

Antecedentes



Solamente en los últimos 20 años, en el ámbito internacional, se ha reconocido como un problema prioritario el manejo de los residuos químicos (Ossa, 2007).



En el Ecuador, a partir de la publicación del Acuerdo Ministerial 061 las leyes ambientales han adquirido mayor peso en el sector industrial, por lo que los laboratorios ambientales juegan un papel importante.



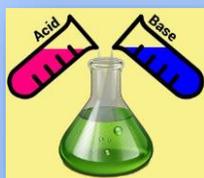
Por este motivo, esta actividad comercial ha crecido durante los últimos años, y de acuerdo al Servicio de Acreditación Ecuatoriano (SAE) para el año 2020 el país cuenta con 125 laboratorios de ensayo de los cuales el 50% se encuentra en Quito.



Sin embargo, durante los ensayos químicos, los residuos líquidos peligrosos generados no cuentan con un correcto almacenamiento y manejo debido al poco espacio o una incorrecta gestión integral.



Por tanto, es importante contar con sistemas de gestión integral de residuos peligrosos en donde considerando el concepto de priorizar el tratamiento, se ha visto como alternativa tratar las descargas líquidas peligrosas en la fuente para mejorar el cuidado al medio ambiente y evitar la entrega de los mismos a un gestor ambiental, de modo que se haga realidad el principio de responsabilidad social.



Para lo cual, tratamientos más utilizados para los residuos químicos peligrosos son neutralización, incineración, recuperación, en donde la neutralización es el más recomendable para residuos peligrosos y no peligrosos.

Planteamiento del problema

MACRO



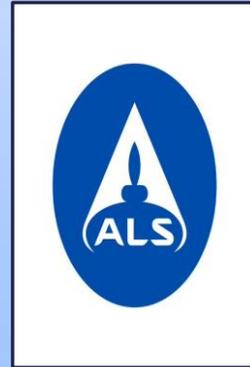
La gestión que se realiza para el manejo de residuos peligrosos está más ligada a países desarrollados debido a que cuentan con el presupuesto e infraestructura para su manejo. Los residuos especiales y peligrosos en Latinoamérica generalmente se mezclan con los ordinarios municipales, dada la falta de control de las autoridades por la carencia de recursos humanos, físicos y financieros (Vega, 2016), así mismo la complejidad de estos residuos contribuyen a la incorrecta gestión (Berrio, Beltrán, Agudelo, & Cardona, 2012).

MESO



En nuestro país, son pocos los laboratorios ambientales que tratan sus residuos químicos peligrosos o que al menos cuentan con un manual para el adecuado manejo de los mismos, ya que en muchas ocasiones el trabajo no se concluye (Vaca, 2012), lo que ocasiona que los mismos no sean entregados a un gestor calificado y por ende descargados sin un tratamiento previo.

MICRO



ALS pese a tener laboratorios estratégicamente ubicados alrededor del mundo, operando en más de 350 locaciones en 55 países no cuenta con un tratamiento para sus residuos líquidos peligrosos, por lo que almacena los mismos para entregar a un gestor ambiental corriendo peligro de derrames.

Objetivo General

Diseñar un sistema de tratamiento físico-químico para la remoción de metales pesados de los residuos líquidos peligrosos generados en los laboratorios ambientales de la ciudad de Quito, provincia de Pichincha, tomando como caso de estudio a ALS Ecuador mediante un procedimiento de neutralización y precipitación.



Objetivos Específicos

- ✓ Realizar toma de muestras y caracterización química de los residuos ácidos generados en ALS Ecuador para comparar con los resultados obtenidos después del tratamiento.
- ✓ Elaborar un reactor químico tipo batch de 20 litros para poner en marcha el tratamiento definido en las pruebas a escala de laboratorio.
- ✓ Evaluar la calidad del agua tratada mediante el tratamiento físico-químico en el reactor para verificar el cumplimiento de los parámetros establecidos en la OM 138.
- ✓ Proponer el sistema de tratamiento físico-químico para los residuos líquidos peligrosos de ALS Ecuador, de manera que sirva de referencia para la implementación en otros laboratorios.



Hipótesis de investigación

El diseño de un sistema de tratamiento físico-químico de neutralización y precipitación para los residuos líquidos peligrosos permitirá la remoción de todos los metales pesados estipulados en la Ordenanza Metropolitana 138, Norma Técnica para Control de Descargas Líquidas, Anexo 1, Tabla N° A1: Límites Máximos Permisibles por Cuerpo Receptor, Alcantarillado del Distrito Metropolitano de Quito para su descarga final.



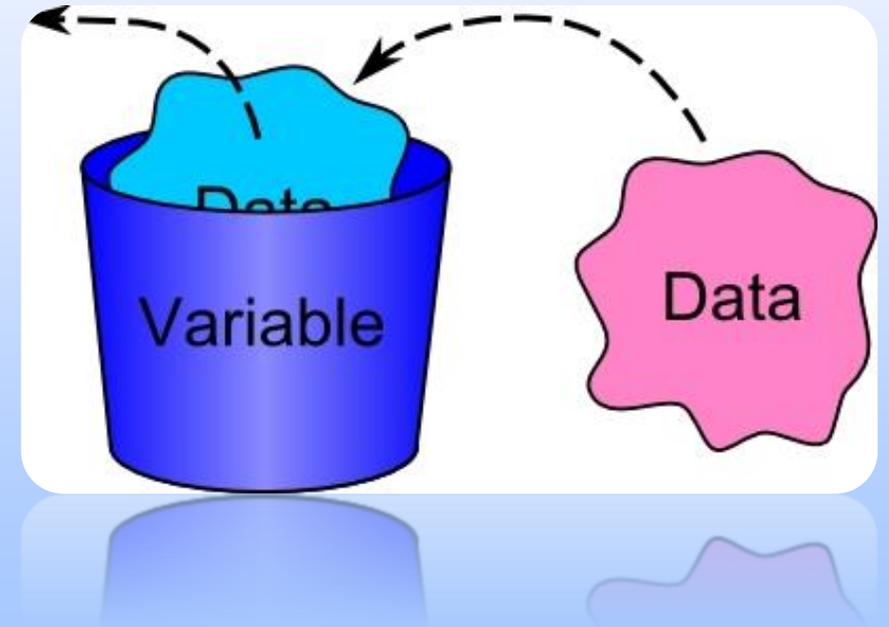
Categorización de las variables de investigación

Variable independiente

- ✓ Concentración inicial de metales pesados
- ✓ Costos de materiales

Variable dependiente

- ✓ pH de reacción
- ✓ Tiempo de residencia
- ✓ Volumen del prototipo del reactor
- ✓ Agitación del prototipo del reactor
- ✓ Concentración de reactivos
- ✓ Calidad de los materiales de construcción

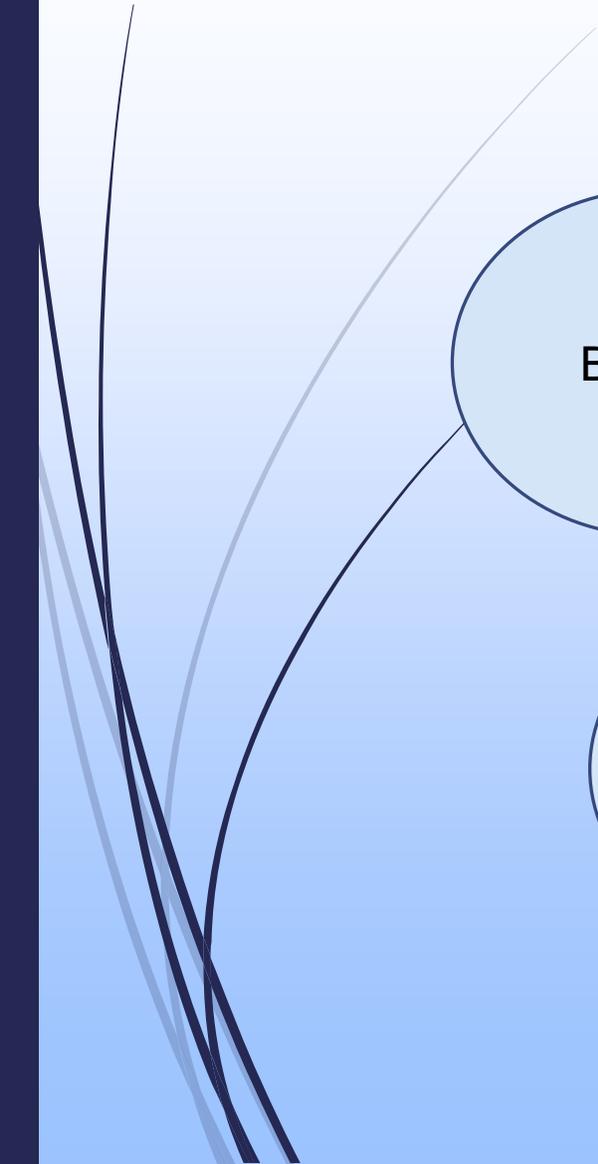


Metodología





Origen de los residuos ALS ECUADOR



Cantidad de residuos líquidos peligrosos generados según su tipo

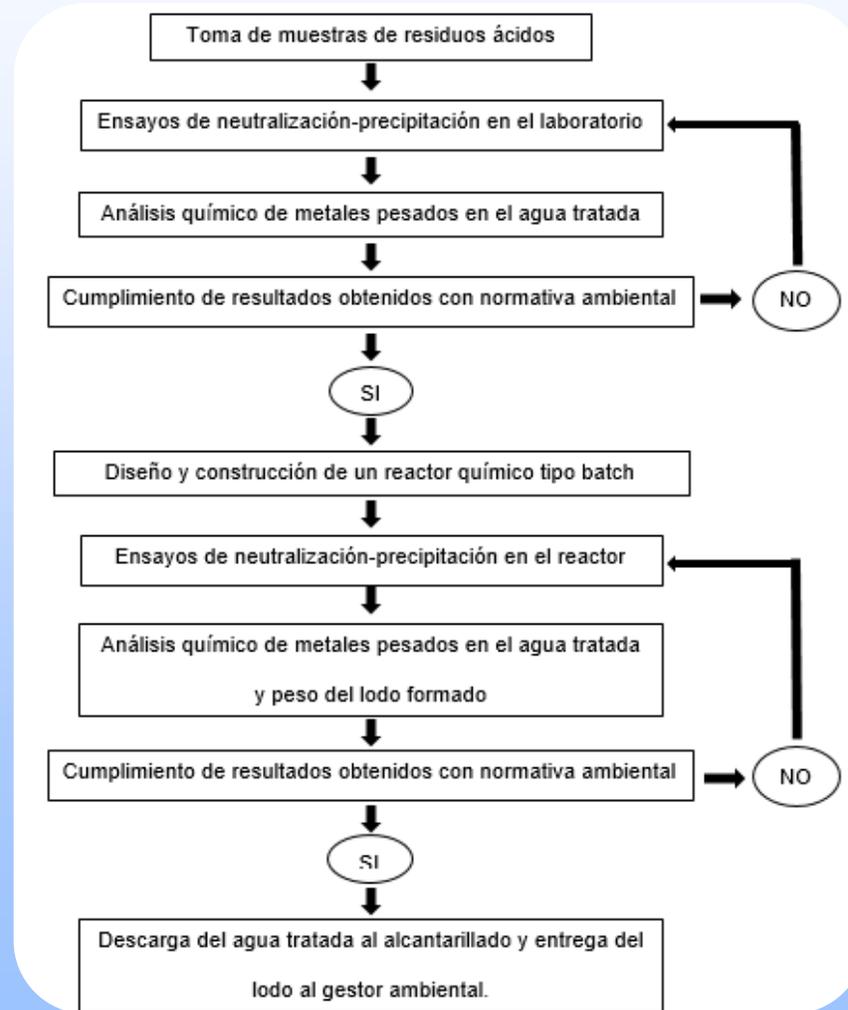
Tabla 1

Cantidad de residuos peligrosos generados por año

Residuo	CRETIB	Código	Basilea	Clasificación	Kg/Año 2020	Precio (\$)	Kg/Año 2021	Precio (\$)
Desechos de soluciones ácidas con pH <2	C	NE-18	Y34 Y35 Y25	Listado de Desechos Peligrosos por fuente no específica	698,5	421,58	1227,4	675,07
Desechos de soluciones alcalinas con pH>12.5	C	NE-19	Y26 Y27 Y28 Y29	Listado de Desechos Peligrosos por fuente no específica	274,5	168,03	430,5	236,78
Solventes orgánicos gastados y mezclas de solventes gastados	T,I	NE-51	Y6	Listado de Desechos Peligrosos por fuente no específica	209,5	145,43	329	148,05

Diseño experimental aplicado

Figura 1
Diseño experimental



Toma de muestras y ensayos de neutralización-precipitación en el laboratorio

Equipos de protección personal

Mandil

Mascarilla

Guantes de nitrilo

Gafas de seguridad

Materiales

Canecas plásticas

Jarra plástica

Papel filtro

Frascos PVC

Vasos de precipitación

Varilla de agitación

Embudo

Espátula

Carbón activado

Equipos de laboratorio

ICP

Multiparámetro

Termómetro

Agitador automático

Balanza analítica

Reactivos químicos

NaOH

H₂SO₄

Procedimiento para la toma de muestras y pruebas de neutralización-precipitación

Se colocaron 100 ml de desecho en un frasco PVC para obtener el blanco



En un vaso de precipitación se colocaron 500 ml de muestra y se añadieron 17,3 g de NaOH pesados previamente en la balanza analítica.



Debido a que en esta prueba se decidió trabajar con $\text{pH} > 10$ se concluye con un volumen final de 500 ml y 17,3 g de NaOH.

Con una varilla de agitación se agitó la muestra durante 1 minuto y se midieron los valores de pH y Temperatura, dando como resultados 10,95 U pH y 41°C, respectivamente

Se deja sedimentar la muestra durante 30 minutos y se procedió a filtrar con papel filtro.



Se desea bajar el pH a 7, por lo que se colocó a la muestra filtrada 16 gotas de H_2SO_4 0,5 N y con esto se obtuvo un pH de 10,80, entonces se añaden 10 gotas más y dio un pH de 10,77.

Una vez obtenido el pH deseado, se separó los 500 ml de muestra en dos vasos de precipitación.

Al no bajar el pH con H_2SO_4 0,5 N se procedió a añadir 10 gotas de H_2SO_4 1:1 obteniendo un pH de 9,87, entonces se añaden 5 gotas más obteniendo un pH de 7,96, finalmente se añade 1 gota más y se obtiene un pH de 7,96; por lo que se concluye con un volumen final de 500 ml de muestra filtrada y 16 gotas de H_2SO_4 1:1.

En el vaso de precipitación 1 se colocaron 150 ml de muestra, se añadió 2 gramos de carbón activado en polvo y se procedió a agitar la muestra con el agitador automático por 15 minutos.



Procedimiento para la toma de muestras y pruebas de neutralización-precipitación (continuación)



Después de los 15 minutos se procedió a filtrar la muestra con papel filtro y se colocó en frasco PVC.

Después de los 15 minutos se procedió a filtrar la muestra con papel filtro y se colocó en frasco PVC.

Se procedió a llenar la cadena de custodia para el ingreso de las muestras al sistema del laboratorio y su posterior análisis de metales pesados..

En el vaso de precipitación 2 se colocaron 260 ml de muestra, se añadió 0,0026 gramos de sulfuro de sodio y se agitó con la varilla de agitación por 1 minuto.

Posteriormente se colocó 3,5 gramos de carbón activado en polvo y se procedió a agitar la muestra con el agitador automático por 15 minutos.

Resultados: Las dos muestras cumplen con todos los metales analizados, por lo que se descarta el uso de Sulfuro de Sodio y se procede a la elaboración del prototipo de reactor químico aplicando el procedimiento del vaso de precipitación N° 1.

Figura 2
Blanco y muestras tratadas



Caracterización química: Resultados obtenidos

Tabla 2

Resultados obtenidos en los ensayos de neutralización-precipitación

N° de prueba		1					2					3			4	
Fecha de análisis		17/09/2021					16/11/2021					14/12/2021			29/12/2021	
Parámetros analizados	⁽¹⁾ Límite máximo permisible	Unidad	Muestra 1		Muestra 2		Blanco 1	Blanco 2	Blanco 3	Blanco 4	Blanco 5	Blanco	Muestra 1		Blanco	Muestra 1
			NaOH: 36,84 g V: 650 ml pH: 6,10 T °: 45 °C	NaOH: 34,4 g V: 555 ml pH: 8,20 T °: 44,5 °C	NaOH: 3,2 g V: 100 ml pH: 7,76 T °: 42 °C	NaOH: 3,3 g V: 104,8 ml pH: 8,47 T °: 47 °C										
Plata	0,5	mg/l	<0,010	<0,010	<0,010	0,282	0,066	0,094	1,37	0,093	3,34	0,243	3,21	0,054		
Aluminio	5,0	mg/l	60,01	0,140	0,169	19,134	14,353	41,976	30,731	14,853	23,16	0,375	52,17	0,149		
Arsénico	0,1	mg/l	0,057	<0,008	0,022	0,074	0,099	0,071	0,052	0,028	0,042	<0,008	0,053	0,018		
Bario	No aplica	mg/l	0,151	<0,008	<0,008	0,249	0,232	0,346	0,162	0,151	0,300	0,010	0,305	<0,008		
Berilio	No aplica	mg/l	0,013	<0,004	<0,004	0,031	0,028	0,022	0,031	0,031	0,025	<0,004	0,026	<0,004		
Calcio	No aplica	mg/l	47,68	8,53	6,32	66,77	54,33	37,96	28,26	25,74	62,60	3,23	37,13	6,21		
Cadmio	0,02	mg/l	0,058	<0,001	<0,001	0,031	0,073	0,051	0,057	0,054	0,042	<0,001	0,044	<0,001		
Cobalto	0,5	mg/l	0,044	<0,004	<0,004	0,034	0,052	0,054	0,049	0,044	0,043	<0,004	0,042	<0,004		
Cromo	No aplica	mg/l	18,73	0,043	0,041	0,940	114,047	106,508	35,443	0,090	33,770	<0,020	0,322	<0,020		
Cobre	1,0	mg/l	16,810	3,655	3,175	0,077	0,204	5,718	0,202	0,131	1,361	0,165	1,43	0,187		
Hierro	25	mg/l	586,52	<0,10	0,11	3,29	229,44	224,940	96,99	3,10	109,43	<0,10	157,09	<0,10		
Litio	No aplica	mg/l	0,046	0,057	0,055	0,054	0,061	0,109	0,074	0,070	0,083	0,077	0,083	0,081		
Magnesio	No aplica	mg/l	145,58	140,98	58,64	50,85	28,39	67,08	49,13	12,92	-	-	-	-		
Manganeso	10,0	mg/l	97,04	7,04	0,257	292,259	216,796	136,269	211,206	265,915	232,84	1,62	241,91	0,302		
Molibdeno	No aplica	mg/l	0,016	<0,008	<0,008	0,055	0,026	0,763	0,013	0,016	0,123	0,040	0,117	0,048		
Níquel	2,0	mg/l	0,167	0,020	<0,010	0,064	0,225	0,136	0,089	0,045	0,102	<0,010	0,095	<0,010		
Plomo	0,5	mg/l	0,053	<0,001	<0,001	0,082	0,112	0,078	0,073	0,118	0,089	<0,001	0,082	<0,001		
Antimonio	No aplica	mg/l	<0,008	<0,008	<0,008	0,035	0,054	<0,008	<0,008	<0,008	0,038	0,023	0,048	0,016		
Selenio	0,5	mg/l	13,06	5,60	6,52	0,186	0,147	3,130	0,016	0,191	0,707	0,133	0,741	0,147		
Estroncio	No aplica	mg/l	0,245	0,035	0,016	0,165	0,391	0,248	0,247	0,126	0,373	0,013	0,193	0,021		
Talio	No aplica	mg/l	0,164	<0,050	<0,050	0,397	0,343	0,245	0,355	0,438	0,263	<0,050	0,251	<0,050		
Vanadio	No aplica	mg/l	0,139	<0,010	<0,010	0,083	0,063	0,178	0,226	0,070	0,116	0,034	0,122	0,028		
Zinc	2,0	mg/l	1,16	<0,010	<0,010	0,358	1,400	3,021	0,529	0,249	1,08	<0,010	0,850	<0,010		
Mercurio	0,01	mg/l	0,0259	0,0119	0,0096	1,8375	0,3945	0,06625	3,3825	0,0431	2,7025	0,639	2,250	0,2005		

Caracterización química: Resultados obtenidos (continuación)

Tabla 2

Resultados obtenidos en los ensayos de neutralización-precipitación

N° de prueba		5					6			7			8		
Fecha de análisis		07/02/2022					09/02/2022			04/03/2022			15/03/2022		
Parámetros analizados	⁽¹⁾ Límite máximo permisible	Unidad	Blanco V= 100 ml	Muestra 1	Muestra	Blanco V= 100 ml	Muestra 1	Muestra	Blanco V= 100 ml	Muestra 1	Muestra	Blanco V= 100 ml	Muestra 1	Muestra 2	
				NaOH: 17,4 g V: 510 ml pH: 8,37 T°: 43 °C	carbón activado (Filtro de 1 capa)		NaOH: 17,3 g V: 500 ml pH: 8,54 T°: 41 °C	carbón activado (Filtro de doble capa)		NaOH: 17,3 g V: 510 ml pH: 8,70 T°: 43 °C	carbón activado V: 250 ml Carbón activado: 2g		Carbón activado: 2 g V: 150 ml pH: 7,6 T°: 41 °C	Carbón activado: 3,5 g V: 260 ml pH: 7,6 Na2S: 0,0026 g T°: 41 °C	
Plata	0,5	mg/l	1,76	0,505	0,138	0,740	0,372	0,252	0,773	0,623	0,091	1,85	<0,010	<0,010	
Aluminio	5,0	mg/l	40,99	0,102	0,051	43,940	0,084	0,056	46,39	0,324	0,339	47,26	0,850	0,919	
Arsénico	0,1	mg/l	0,126	0,047	0,053	0,127	0,061	0,058	0,132	0,044	0,046	0,138	0,037	0,040	
Bario	NO APLICA	mg/l	0,423	<0,008	0,167	0,202	0,010	0,033	0,144	<0,008	0,018	0,470	<0,008	<0,008	
Berilio	NO APLICA	mg/l	0,025	<0,004	<0,004	0,024	<0,004	<0,004	0,025	<0,004	<0,004	0,021	<0,004	<0,004	
Calcio	NO APLICA	mg/l	47,69	3,61	44,63	49,09	3,68	12,22	55,88	3,21	5,93	51,36	12,12	12,15	
Cadmio	0,02	mg/l	0,042	0,001	<0,001	0,041	<0,001	<0,001	0,045	<0,001	<0,001	0,043	<0,001	<0,001	
Cobalto	0,5	mg/l	0,055	<0,004	<0,004	0,053	<0,004	<0,004	0,060	<0,004	<0,004	0,049	<0,004	<0,004	
Cromo total	NO APLICA	mg/l	50,04	0,025	<0,020	57,396	0,023	<0,020	56,750	<0,020	<0,020	48,110	<0,020	<0,020	
Cobre	1,0	mg/l	0,808	0,081	0,058	0,811	0,061	0,051	0,855	0,127	0,003	0,816	<0,001	<0,001	
Hierro	25	mg/l	170,30	<0,10	<0,10	177,18	<0,10	<0,10	193,73	<0,10	<0,10	187,73	<0,10	<0,10	
Litio	NO APLICA	mg/l	0,096	0,088	0,091	0,101	0,095	0,096	0,100	0,073	0,075	0,097	0,075	0,075	
Magnesio	NO APLICA	mg/l	69,81	43,16	65,67	75,97	46,92	53,16	79,57	12,70	13,54	76,51	5,78	5,74	
Manganeso	10,0	mg/l	105,85	1,04	0,04	204,51	0,843	0,056	221,59	0,225	0,125	195,21	0,024	0,024	
Molibdeno	NO APLICA	mg/l	4,33	0,987	0,930	5,829	1,42	1,44	6,23	3,97	4,30	5,58	3,75	3,91	
Níquel	2,0	mg/l	0,093	0,012	<0,010	0,091	<0,010	<0,010	0,092	<0,010	<0,010	0,077	<0,010	<0,010	
Plomo	0,5	mg/l	0,075	<0,001	<0,001	0,067	<0,001	<0,001	0,065	<0,001	<0,001	0,079	<0,001	<0,001	
Antimonio	NO APLICA	mg/l	0,042	<0,008	0,021	0,042	<0,008	<0,008	0,023	0,013	<0,008	<0,008	<0,008	<0,008	
Selenio	0,5	mg/l	0,445	0,116	0,099	0,355	0,111	0,112	0,308	0,118	0,108	0,355	0,058	0,111	
Estroncio	NO APLICA	mg/l	0,267	0,014	0,325	0,268	0,013	0,099	0,284	<0,008	0,019	0,273	0,056	0,047	
Talio	NO APLICA	mg/l	0,190	<0,050	<0,050	0,184	<0,050	<0,050	0,194	<0,050	<0,050	0,148	<0,050	<0,050	
Vanadio	NO APLICA	mg/l	0,314	0,021	0,028	0,362	0,083	0,085	0,395	0,106	0,102	0,354	0,068	0,067	
Zinc	2,0	mg/l	0,696	<0,010	<0,010	0,688	<0,010	<0,010	0,773	<0,010	<0,010	0,580	<0,010	<0,010	
Mercurio	0,01	mg/l	1,23	1,15	0,271	1,163	0,938	0,673	1,23	1,08	0,065	2,04	0,005	0,005	

Diseño y construcción del prototipo del reactor químico

Dimensionamiento



Reactor tipo batch



volúmenes constantes
y en condiciones
isotérmicas

Selección de los materiales

- ✓ Calidad del material
- ✓ Costo del material
- ✓ Disponibilidad de equipos en el mercado



Los materiales de construcción de los reactores a pequeña (0.01 y 0.3 litros) y mediana escala (0.25 a 5 litros), pueden ser de vidrio o metal; mientras que para mayores volúmenes se usa solamente recipientes de metal (Coronel, 2014).

Dimensiones del reactor

Para diseñar plantas piloto se usan rectores de 5 a 20 litros para grandes volúmenes y de 30 a 250 litros para plantas piloto, la agitación en estos equipos puede ir de 0 a 2400 revoluciones por minuto (Coronel, 2014).

Para realizar la descarga de los lodos por gravedad se diseñó un reactor tipo cono, para lo cual se determinó primero el volumen del cilindro:

$$V_c = 3.1416 \times r^2 \times h$$

Donde:

V_c = volumen del cilindro

r = radio del cilindro = 15 cm

h = altura del cilindro = 27 cm

$$V_c = 3,1416 \times (1,5 \text{ dm})^2 \times 2,7 \text{ dm}$$
$$V_c = 19,08 \text{ dm}^3 = 19,08 \text{ litros}$$

Seguido, se realizó el cálculo del volumen del cono:

$$V_c = \frac{3,1416 \times r^2 \times h}{3}$$

Donde:

V_c = volumen del cono

r = radio del cono = 15 cm

h = altura del cono = 3 cm

$$V_c = \frac{3,1416 \times (1,5 \text{ dm})^2 \times 0,3 \text{ dm}}{3}$$
$$V_c = 0,71 \text{ dm}^3 = 0,71 \text{ litros}$$

Dimensiones del reactor

Sumando el volumen del cilindro y el volumen del cono, nos da un volumen final de:

$$V_f = 19,08 \text{ litros} + 0,71 \text{ litros} = 19,79 \text{ litros}$$
$$V_f = 20 \text{ litros}$$

Sin embargo, a este volumen se debe incrementar un volumen extra de seguridad, el cual es un factor de seguridad por nivel de llenado.

$$\text{Volúmen de seguridad} = V_f \times 0,2$$
$$\text{Volúmen de seguridad} = 20 \text{ litros} \times 0,2$$
$$\text{Volúmen de seguridad} = 4 \text{ litros}$$

Por otro lado, la longitud del reactor debería ser 30 cm considerando las alturas del cilindro y del cono, pero se debe aumentar la altura del recipiente despejando h de la fórmula del volumen del cilindro:

$$h = \frac{V_c}{3,1416 \times r^2}$$

De esta manera, la altura de seguridad del recipiente es:

$$h = \frac{4 \text{ dm}^3}{3,1416 \times (1,5 \text{ dm})^2}$$
$$h = 0,56 \text{ dm} = 5,6 \text{ cm}$$

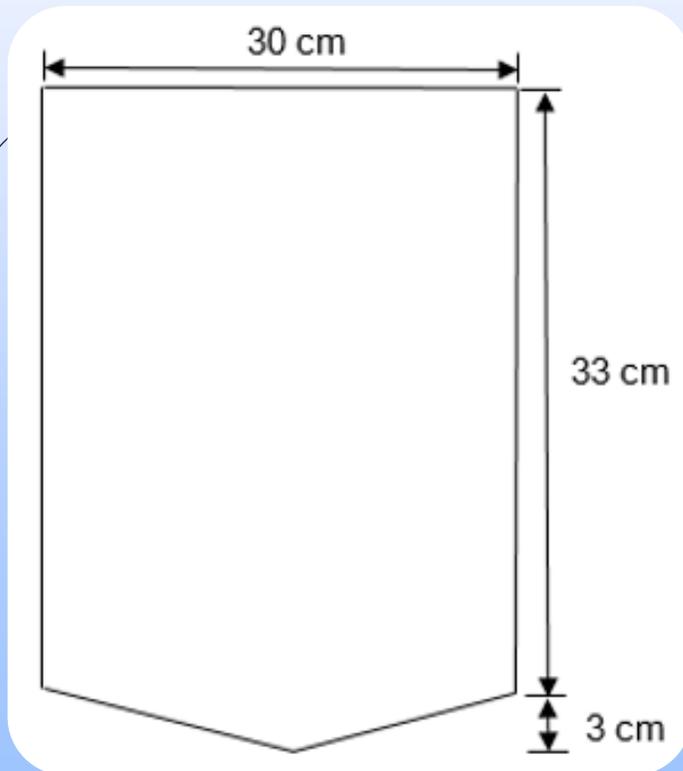
Por tanto, la altura final del reactor es::

$$h_{\text{final}} = 30 \text{ cm} + 5,6 \text{ cm} = 36 \text{ cm (sin tapa)}$$

Dimensiones del reactor

De acuerdo a lo expuesto, el reactor construido tiene las siguientes dimensiones:

Figura 3
Dimensiones del reactor para 20 litros



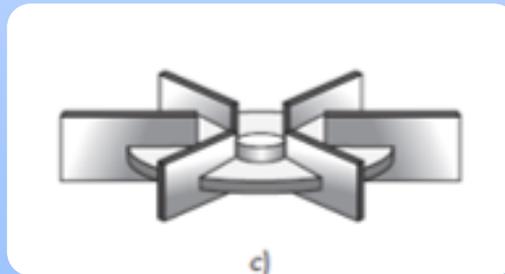
Dimensiones del agitador

“La agitación se refiere principalmente al movimiento que se genera en un material de una manera específica, principalmente con un equipo que genera movimiento circulatorio dentro de algún tipo de contenedor o estanque el cual puede ser cerrado o abierto” (Castillo V. , 2013)

Se busca minimizar puntos muertos dentro del recipiente, Se debe seleccionar el rodete adecuado y calcular la potencia del motor del agitador para que este proporcione un correcto mezclado dentro del reactor (Coronel, 2014).

Los tres principales tipos de impulsores son de palas, turbinas y hélices. Si bien existen otros tipos, los mencionados solucionan entre un 95 y 100% de todos los problemas de agitación” (Castillo V. , 2013).

Figura 4
Agitador



Se define utilizar un impulsor de turbina del tipo hojas planas y disco de 6 palas, ya que este tipo de impulsor trabaja principalmente para fluidos de baja viscosidad y para velocidades que pueden ser medias o altas.

Dimensiones del agitador

Diámetro del impulsor:

$$Da = \frac{Dt}{3}$$

Donde:

Dt: diámetro del tanque

$$Da = \frac{30 \text{ cm}}{3}$$

$$Da = 10 \text{ cm}$$

Altura del impulsor:

$$E = \frac{Dt}{3}$$

$$E = \frac{30 \text{ cm}}{3}$$

$$E = 10 \text{ cm}$$

Ancho de las paletas impulsoras:

$$W = \frac{Da}{5}$$

$$W = \frac{10 \text{ cm}}{5}$$

$$W = 2 \text{ cm}$$

Longitud de las paletas impulsoras:

$$L = \frac{Da}{4}$$

$$L = \frac{10 \text{ cm}}{4}$$

$$L = 2,5 \text{ cm}$$

Altura optima del líquido:

$$H = 1 \times Dt$$

$$H = 1 \times 30 \text{ cm}$$

$$H = 30 \text{ cm}$$

Dimensiones del agitador

Volumen óptimo de agitación:

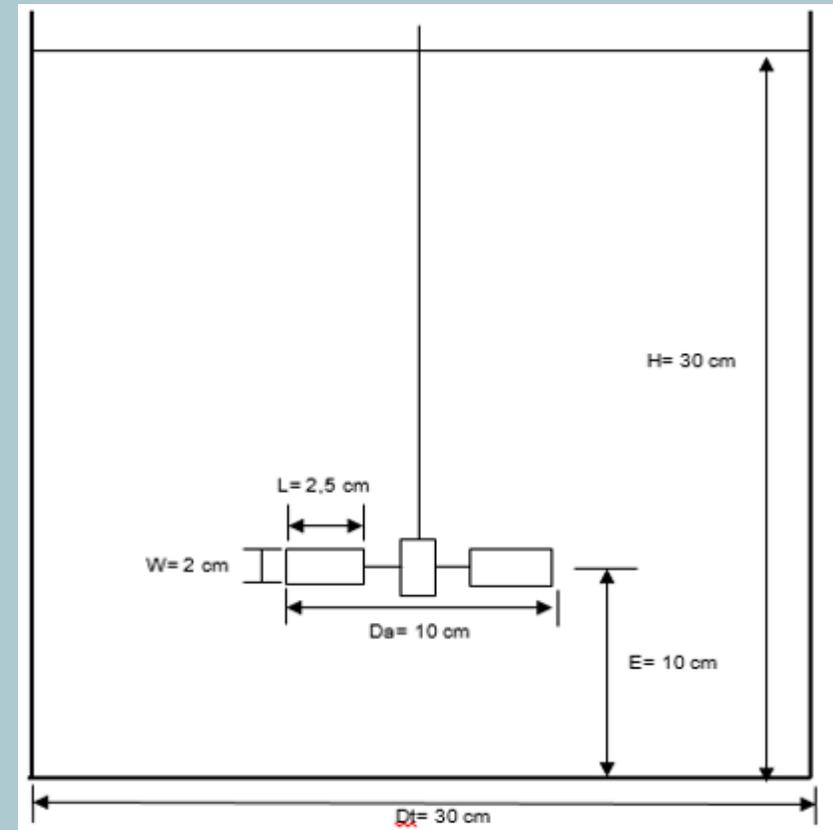
$$V_c = \frac{3,1416 \times D_i^2 \times H}{4}$$

$$V_c = \frac{3,1416 \times (30 \text{ cm})^2 \times 30 \text{ cm}}{4}$$

$$V_c = 21205,8 \text{ cm}^3$$

$$V_c = 21,20 \text{ L}$$

Figura 4
Dimensiones del agitador



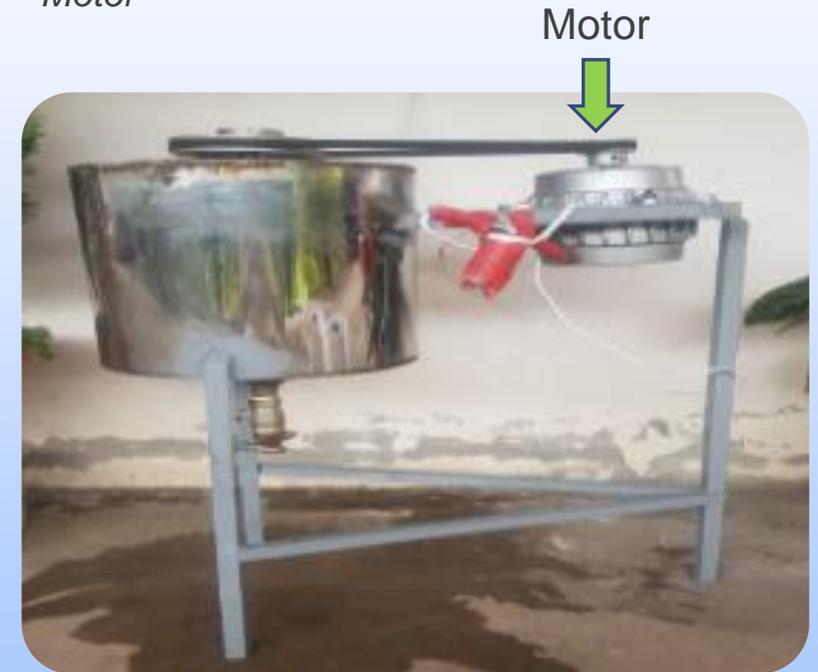
Potencia del motor

Para que el proceso de agitación sea eficaz, el volumen del fluido agitado debe ser capaz de llegar hasta las partes más lejanas del estanque.

“Se puede conocer la potencia consumida por el agitador a través de números adimensionales, relacionando por medio de gráficos el número de Reynolds y el número de potencia” (Castillo V. , 2013).

Para calcular la potencia del motor se debe tener en cuenta la viscosidad y densidad del fluido a mezclar (Coronel, 2014).

Figura 5
Motor



Potencia del motor

El cálculo de la potencia del motor se lo realizó para un rango de densidades y viscosidades de la siguiente manera:

Número de Reynolds:

$$N_{Re} = \frac{Da^2 \times N \times \rho}{\mu}$$

Donde:

Da= Diámetro del agitador

N= Velocidad de rotación

ρ = Densidad del fluido

μ = Viscosidad del fluido

El valor del número de Reynolds define si el carácter del fluido es turbulento o laminar.

Además se considera que el paso entre el régimen laminar y el turbulento no es inmediato, pasando por una zona de transición, por lo que se define de la siguiente manera:

➤ Régimen laminar: $Re \leq 2000$

➤ Régimen transitorio: 2000 a 4000

➤ Régimen turbulento: $Re \geq 4000$

Potencia del motor

Número de potencia:

$$N_p = \frac{P}{\rho \times N^3 \times Da^5}$$

Donde:

Da= Diámetro del agitador

N= Velocidad de rotación

ρ = Densidad del fluido

P= Potencia del agitador

Para el cálculo del número de Reynolds se tomó un rango de velocidades de agitación desde 0.1 revoluciones por segundo (6 RPM) hasta 100 revoluciones por segundo (6000 RPM). Mientras que los valores de viscosidades y densidades se usó las propiedades del Hidróxido de Sodio.

De esta manera se obtuvieron los siguientes resultados:

Datos:

Da= 10 cm = 0,1 m

N= 0,1 rps

ρ = 1100 kg/m³

μ = 0,001 kg/m.s

$$N_{Re} = \frac{Da^2 \times N \times \rho}{\mu}$$

$$N_{Re} = \frac{(0,1m)^2 \times 0,1s^{-1} \times 1100 \frac{kg}{m^3}}{0,001 \frac{kg}{m \times s}}$$

$$N_{Re} = 1100$$

Potencia del motor

Tabla 3

Relación de Reynolds en función de la velocidad de agitación

Re	N
1100	0,1
2200	0,2
3300	0,3
4400	0,4
5500	0,5
11000	1
22000	2
33000	3
44000	4
55000	5
66000	6
77000	7
88000	8
99000	9
110000	10
1100000	100

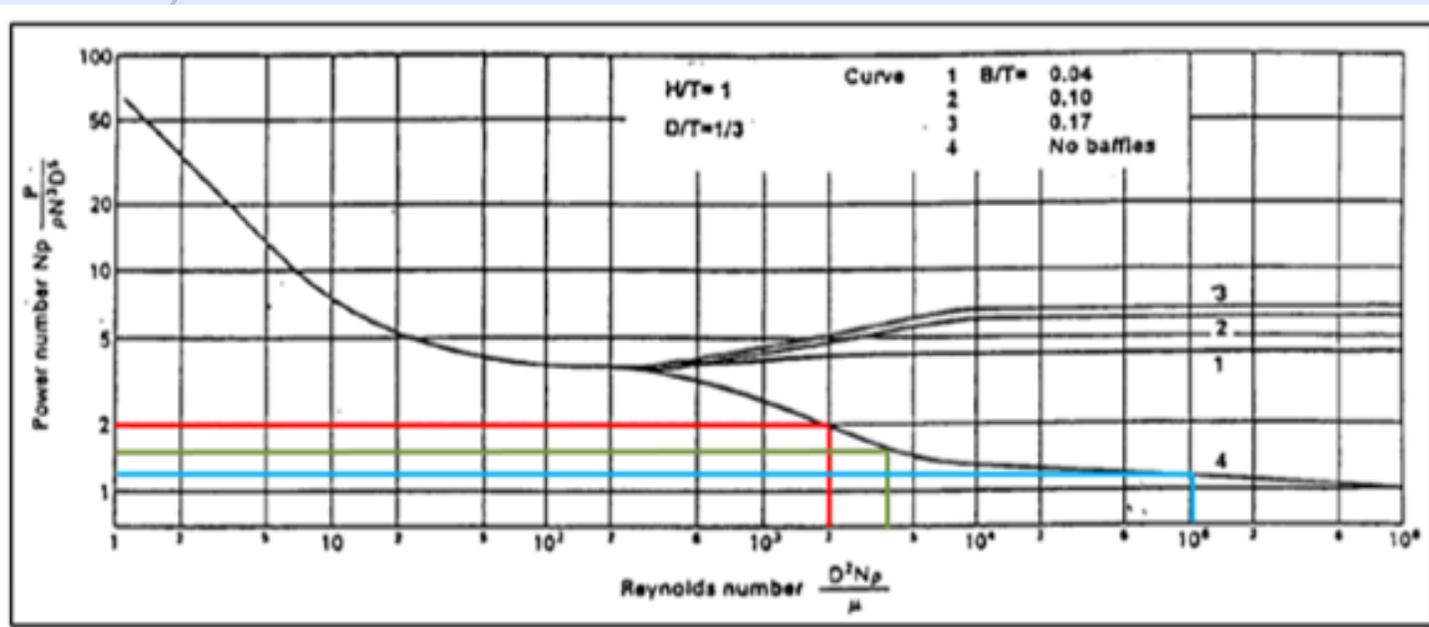
Como se puede observar en la tabla 3, el flujo laminar termina a $N= 0,2$; flujo de transición termina a $N= 0,4$ y flujo turbulento los valores mayores a $0,4$ rps.

Potencia del motor

Con los números de Reynolds obtenidos para flujo laminar, de transición y turbulento, se procede a calcular el número de potencia mediante la siguiente figura:

Figura 5

Número de potencia para tres valores de Reynolds



Como se puede observar la curva número 4 corresponde a un recipiente sin deflectores, por tanto para un número de Reynolds de 2000 aproximadamente, se obtiene un número de potencia (N_p) de 2, para un Reynolds de 4000, $N_p = 1.6$ y para un Reynolds de 100000 un $N_p = 1.3$.

Potencia del motor

La agitación para plantas pilotos puede ir de 0 a 2400 revoluciones por minuto, por lo que se utilizó un motor eléctrico de 100 Watts de potencia y mediante pruebas con agua dentro del reactor se determinó una velocidad óptima de 700 RPM.

De esta manera se obtiene la potencia requerida para cada número de Reynolds mediante la siguiente fórmula:

$$N_p = \frac{P}{\rho \times N^3 \times Da^5}$$
$$P = N_p \times \rho \times N^3 \times Da^5$$

► Para Re= 2000

$$P = 2 \times 1100 \frac{kg}{m^3} \times (0,2^{s^{-1}})^3 \times (0,1m)^5$$

$$P = 0,000176 \frac{kg \times m^2}{s^3}$$

$$P = 0,000176 W$$

$$P = 0,000000236 HP$$

► Para Re= 4000

$$P = 1,6 \times 1100 \frac{kg}{m^3} \times (0,4^{s^{-1}})^3 \times (0,1m)^5$$

$$P = 0,00113 \frac{kg \times m^2}{s^3}$$

$$P = 0,00113 W$$

$$P = 0,00000152 HP$$

► Para Re= 100000

$$P = 1,3 \times 1100 \frac{kg}{m^3} \times (10^{s^{-1}})^3 \times (0,1m)^5$$

$$P = 14,4 \frac{kg \times m^2}{s^3}$$

$$P = 14,3 W$$

$$P = 0,019 HP$$

Viscosidad máxima

Con estos datos se procede a calcular la viscosidad máxima a la que puede funcionar el motor seleccionado considerando un número de Reynolds de flujo turbulento, mediante el siguiente cálculo:

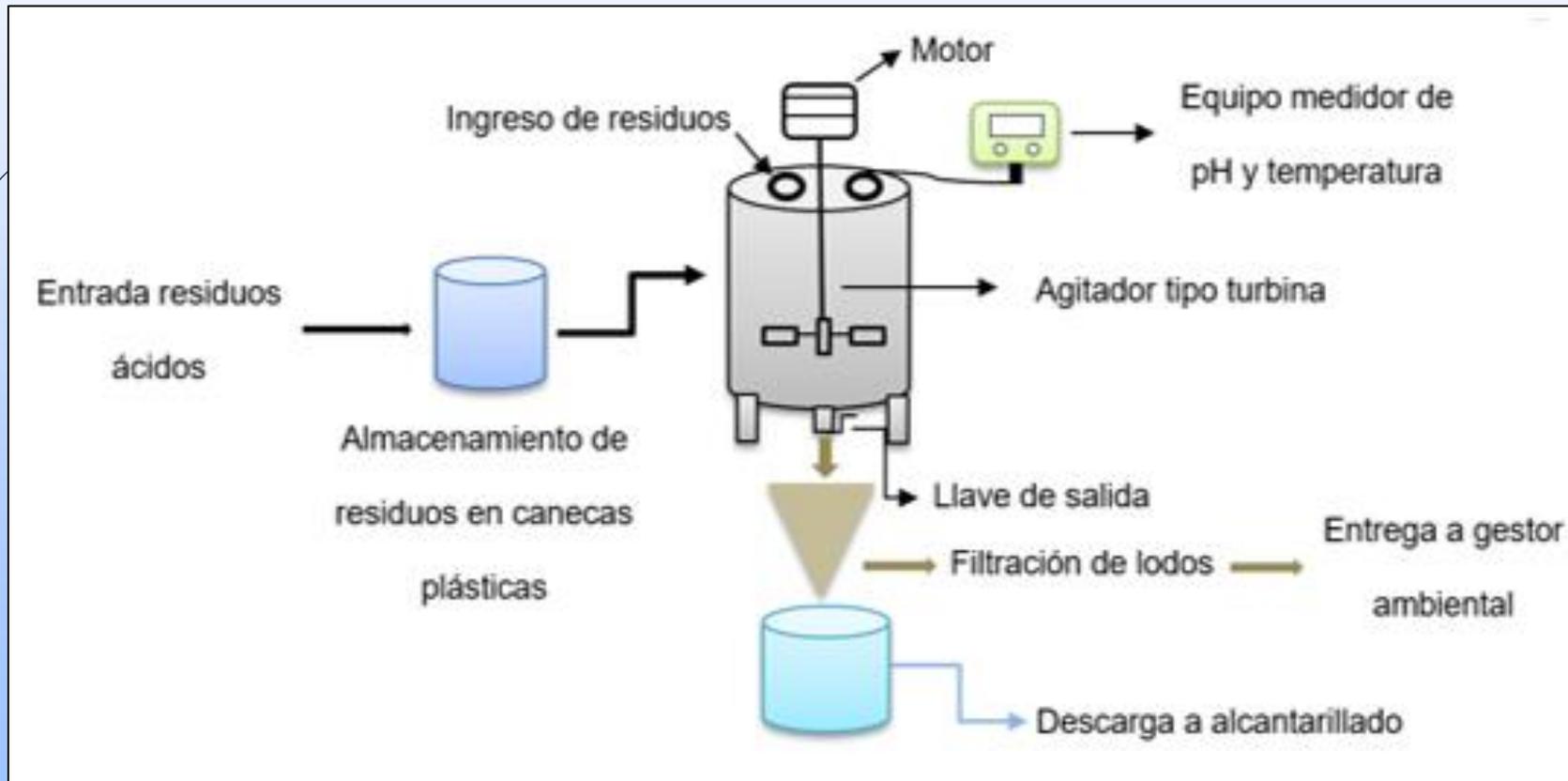
$$\mu = \frac{P}{N_{re} \times N_p \times N^2 \times Da^3}$$
$$\mu = \frac{100 \text{ W}}{4000 \times 1,6 \times (11,67s^{-1})^2 \times (0,1m)^3}$$
$$\mu = 0,115 \frac{\text{kg}}{\text{m} \times \text{s}}$$
$$\mu = 115 \text{ Centipoise}$$

La viscosidad máxima aproximada a la que puede funcionar el motor es de 0,115 kg/m.s, considerando que la viscosidad del Hidróxido de Sodio es de 0,001 kg/m.s, se concluye que las características del motor seleccionado son correctas.

Diseño general de la planta piloto

Figura 6

Diseño del reactor químico tipo batch de 20 litros



Resultados obtenidos en el reactor químico

Tabla 4

Comparación de resultados con normativa ambiental y porcentaje de remoción de contaminantes

Parámetros analizados	⁽¹⁾ Límite máximo permisible	Unidad	Blanco V= 100 ml	Muestra tratada NaOH: 0,45 kg H2SO4: 17 ml Carbón activado: 0,17 kg V: 20 L pH: 7,8 T°: 53 °C	Porcentaje de remoción (%)
Plata	0,5	mg/l	0,201	<0,010	95,02
Aluminio	5,0	mg/l	56,331	15,12	73,16
Arsénico	0,1	mg/l	0,243	0,029	88,07
Bario	No aplica	mg/l	0,312	0,023	92,63
Berilio	No aplica	mg/l	0,032	<0,004	87,50
Calcio	No aplica	mg/l	60,64	5,06	91,66
Cadmio	0,02	mg/l	0,043	0,014	67,44
Cobalto	0,5	mg/l	0,057	<0,004	92,98
Cromo total	No aplica	mg/l	28,12	0,168	99,40
Cobre	1,0	mg/l	1,167	0,005	99,57
Hierro	25	mg/l	139,61	<0,10	99,93
Litio	No aplica	mg/l	0,116	0,082	29,31
Magnesio	No aplica	mg/l	117,25	<1,00	99,15
Manganeso	10,0	mg/l	174,5	<0,010	99,99
Molibdeno	No aplica	mg/l	4,8	0,010	99,79
Níquel	2,0	mg/l	0,163	<0,010	93,87
Plomo	0,5	mg/l	0,081	<0,001	98,77
Antimonio	No aplica	mg/l	0,035	0,018	48,57
Selenio	0,5	mg/l	0,913	0,008	99,12
Estroncio	No aplica	mg/l	0,353	0,067	81,02
Talio	No aplica	mg/l	0,188	<0,050	73,40
Vanadio	No aplica	mg/l	0,302	0,050	83,44
Zinc	2,0	mg/l	0,496	0,04	91,94
Mercurio	0,01	mg/l	0,186	<0,002	98,92

Evaluación del peso final del lodo filtrado

El lodo resultante del proceso de neutralización-precipitación filtró en 12 horas, mientras que el lodo generado de la aplicación de carbón activado filtró en 9 horas.

Estos residuos fueron secados en la estufa para eliminar el contenido de humedad y obtener valores reales.

Posteriormente fueron pesados en la balanza analítica dando como resultado lo siguiente:

Lodo proceso con NaOH: 0,082 kg

Lodo proceso con carbón activado: 0,043 kg

Lodo total: 0,13 kg/20 litros

Figura 6

Filtración del lodo



Análisis del costo de tratamiento por litro

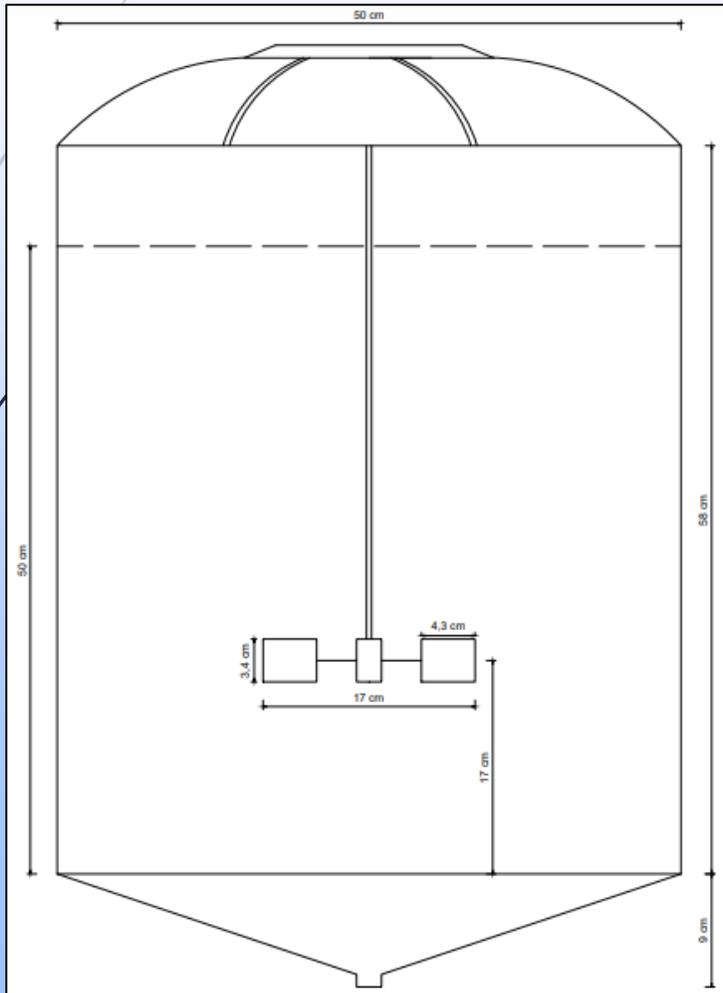
Tabla 5

Costo aproximado del tratamiento por litro de desecho

Materiales	Costo de materiales (\$)	Cantidad usada para tratar 20 litros	Costo estimado para tratar 20 litros (\$)	Costo de gestor ambiental para tratar 0,13 kg de lodo (\$)	Costo de gestor ambiental para tratar 20 litros (\$)	Costo final aproximado para tratar 20 litros de desecho incluido lodo (\$)	Costo final aproximado para tratar 1 litro de desecho incluido lodo (\$)	Ahorro en 1 litro de muestra tratada (\$)
Hidróxido de Sodio	\$0,68/Kg	0,45 kg	0,31					
Ácido Sulfúrico 1:1	\$33/2,5 L	0,017 L	0,22	\$0,55/kg	\$0,55/L	2,3	0,12	0,43
Carbón activado en polvo	\$10/Kg	0,17 kg	1,7					
TOTAL (\$)			2,23	0,07	11	2,3	0,12	0,43

Dimensiones del reactor químico para tratar 100 litros de desecho

Figura 7



Altura: 67 cm
Diámetro: 50 cm
Diámetro impulsor: 17 cm
Altura impulsor: 17 cm
Ancho paletas impulsoras: 3,4 cm
Longitud paletas impulsoras: 4,3 cm
Altura óptima del líquido: 50 cm
Potencia requerida: 0,23 Hp=172 Watts

Conclusiones

Mediante diferentes pruebas realizadas a escala de laboratorio se definió el procedimiento de neutralización-precipitación necesario para precipitar todos los metales establecidos en la Ordenanza Metropolitana 138 del DMQ, descarga: Alcantarillado.

Se diseñó y construyó un reactor tipo batch de acero galvanizado con capacidad de 20 litros, agitación automática y un impulsor tipo turbina de 6 palas como planta piloto para poner en marcha el procedimiento definido.

No se puede establecer concentraciones fijas de hidróxido de sodio y ácido sulfúrico a utilizar, ya que si bien es cierto se está trabajando con residuos de pH ácidos, la concentraciones de iones de hidrogeno siempre serán distintas aunque sean del mismo tipo o tengan el mismo origen, por tal motivo es necesario realizar el procedimiento con lecturas de pH en tiempo continuo, puesto que de este parámetro depende el éxito del tratamiento.

Se realizó una prueba de funcionamiento del reactor mediante una réplica de la última practica realizada en el laboratorio, en el cual se midieron valores de pH, temperatura, tiempo de agitación, concentraciones usadas de hidróxido de sodio, ácido sulfúrico, carbón activado, tiempo de filtración del lodo y peso final del lodo.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en el ensayo realizado en el reactor fueron muy parecidos a los obtenidos en las prácticas de laboratorio a excepción del Aluminio, puesto que presentó una concentración de 15,12 mg/l encontrándose fuera de cumplimiento.

La alta concentración de aluminio se debe al material del cual fue elaborado el reactor químico para la prueba piloto, ya que el acero galvanizado contiene recubrimiento de aluminio que fue desprendido durante el tratamiento.

Se realizó la propuesta de diseño de un reactor químico para 100 litros de desechos ácidos planteando que el laboratorio realice el tratamiento 1 vez al mes.

Con la implementación de este sistema de tratamiento, el laboratorio generaría un ahorro aproximado de \$0,43/litro considerando el costo para tratar desechos ácidos y lodos que el laboratorio paga al gestor ambiental con el que trabaja actualmente, por tanto cada laboratorio que llegase a implementar este tratamiento debe presupuestar el costo de su tratamiento.

Recomendaciones

Se recomienda la construcción del reactor en materiales que no tengan aleaciones para evitar desprendimiento de metales durante el tratamiento. El material más común y de fácil disponibilidad en el mercado es acero inoxidable AISI 304, sin embargo, otra opción más económica pero menos común es material PVC. Esto dependerá de la decisión del laboratorio.

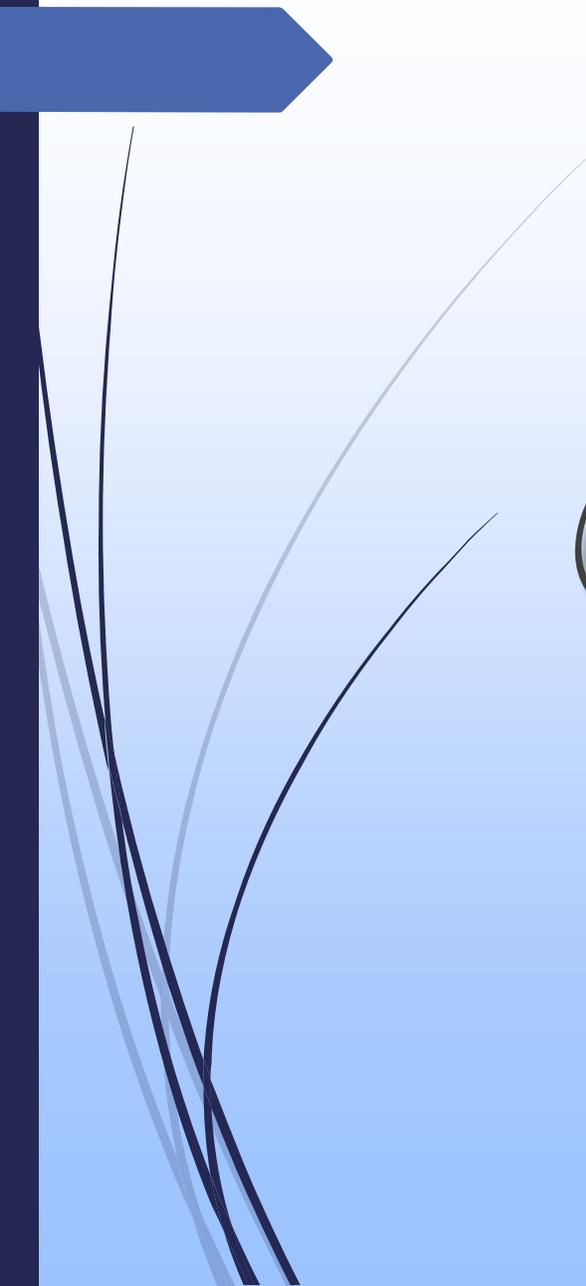
Se sugiere realizar ensayos a escala del laboratorio con diferentes concentraciones de carbón activado para determinar la concentración más baja y que cumpla el objetivo de remover el Mercurio, puesto que las pruebas se las realizó con la misma concentración de carbón.

Recomendaciones

Se recomienda el uso de un carbón activado de uso industrial debido que son más baratos que el aplicado en los ensayos a escala de laboratorio y en el prototipo.

La filtración de los lodos se la realizó en papel filtro, sin embargo, se recomienda realizar pruebas en filtros de tela, puede ser de hilo deshilachado para retener toda la cantidad de lodo sin peligro que se tapone el filtro.

Si se desea acelerar el proceso de filtración del lodo, se recomienda realizar pruebas con coagulantes aniónicos, sin embargo, considerar que esto aumentará el costo final, por tal motivo se decidió realizar el tratamiento 1 vez al mes para evitar inconvenientes por acumulación de desechos.



GRACIAS